

机场群终端区离港航班协同排序方法研究

宛照坤^{1,2}, 彭瑛^{1,2}, 叶文婕^{1,2}

(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京市 211106;

2. 空中交通管理系统全国重点实验室, 江苏 南京市 211106)

摘要: 【目的】当前空中交通领域中, 机场群系统频繁出现的飞行冲突、离港航班延误等问题日益成为影响航班运行效率和旅客满意度的关键因素。鉴于此, 本研究旨在探讨机场群系统中离港航班的协同排序问题。【方法】在考虑机场群系统资源约束的基础上, 引入“机场满意度”这一概念, 以离港航班总延误最小化、所有机场满意度之和最大化以及机场群系统内机场公平性的整体度量最大化为优化目标, 建立机场群终端区离港航班协同排序模型, 设计带精英策略的非支配排序多目标遗传算法, 求解机场群终端区离港航班协同排序问题的 Pareto 最优解。以京津地区的三个机场终端区为例进行了实例分析, 验证了所提出模型和方法的有效性。【结果】实验结果表明, 与先到先服务方案相比较, 航班总延误从 7796 秒减少至 5029 秒, 降低了 35.3%, 平均每一架航班延误时间从 159 秒降到 103 秒, 航班满意度平均满意度达到 0.7867, 机场群中机场公平性的整体度量为 0.0044。【结论】所提出的优化方法能够显著降低机场群系统中离港航班的总延误, 提高航班总满意度, 实现资源的公平高效使用。

关键词: 机场群终端区; 协同排序模型; 离港航班满意度; 非支配排序多目标遗传算法

中图分类号: V355

文献标识码: A

Research on Collaborative Sequencing Methods for Departing Flights in Airport Cluster Terminal Area

Abstract: 【Objective】In the current domain of air traffic, frequent flight conflicts and departure flight delays within airport systems are increasingly becoming key factors that affect the efficiency of flight operations and passenger satisfaction. In light of this, the present study aims to explore the collaborative sequencing problem of departure flights within airport systems. 【Method】By considering the resource constraints of airport systems, the concept of "airport satisfaction" is introduced. The objectives of optimization include minimizing the total delay of departure flights, maximizing the sum of satisfaction across all airports, and maximizing the overall measure of fairness within the airport system. A collaborative sequencing model for departure flights in the terminal area of airport clusters is established, and an elitist strategy-based non-dominated sorting genetic algorithm is designed to solve the Pareto optimal solution for the collaborative sequencing problem of departure flights in the terminal area of airport clusters. An empirical analysis was conducted using the terminal areas of three airports in the Beijing-Tianjin region as examples, validating the effectiveness of the proposed model and method. 【Result】The experimental results show that compared to the first-come-first-served scheme, the total flight delay was reduced from 7,796 seconds to 5,029 seconds, a decrease of 35.3%, with the average delay per flight dropping from 159 seconds to 103 seconds. The average satisfaction of flights reached 0.7867, and the overall measure of fairness among airports in the cluster was 0.0044. 【Conclusion】The proposed optimization method can significantly reduce the total delay of departure flights in airport systems, improve overall flight satisfaction, and achieve the fair and efficient use of resources.

Keywords: Airport Cluster Terminal Area; Collaborative Sequencing Model; Departure Flight Satisfaction; Non-dominated Sorting Multi-objective Genetic Algorithm

【研究意义】在经济迅速发展的背景下, 民航业迎来了一个快速增长时期, 空中交通流量的需求呈现持续增长趋势。为了应对这

一需求, 越来越多的城市着手建设新机场, 机场群系统的逐步形成。单个机场航班调度只关注本机场的进离港航班, 进离场点的冲

突少, 航班调度的复杂性较低; 而在机场群系统中, 由于机场间的地理位置邻近, 共用进离场点、航路和航线, 运营环境复杂多变, 冲突常态化, 航班调度的难度远远高于单机场系统^[1-5]。鉴于此, 对机场群终端区离港航班进行合理排序、空域资源均衡配置, 减少航班延误, 提高机场群系统的协同运行效率, 成为迫切需要解决的问题。

【研究现状】国内外学者关于机场群系统中进离场航班排序问题进行了大量研究, Ming Liu 等^[6]基于两阶段无等待混合流水车间理论对机场群系统的离场航班进行调度, 将机场视为第一阶段的机器, 离场点视为第二阶段的机器, 所有的飞机都必须在这两个机器上完成加工, 构建以最小化总加权延误时间为目标的机场群离港航班调度模型, 通过开发一种 CPLEX 算法对模型求解。Alan 等^[7]考虑机场群终端区离场点和跑道资源约束限制, 以当前机场为研究中心, 构建在机场群影响下的当前机场离港航班调度模型。Ziqi Li 等^[8]针对机场群离港航班调度问题, 提出了一个两步优化框架, 首先以总延误时间和调度混乱最小为目标, 对离港航班的起飞时间进行优化, 随后根据计算出的最佳起飞时间对 SID 进行优化, 通过多 agent 强化学习的方法来实现起飞时间和 SID 选择的优化。Wang 等^[9]在动态扇区容量限制的机场群系统中, 开发一个最小化总延误的地面等待动态模型。该模型通过将空中延误转成地面延误来确定需要延迟的航班及延迟时长, 从而提高运行安全。马圆圆等^[10]通过考虑尾流间隔、管制移交间隔、放行间隔、进离场跑道安全间隔, 航班起飞和降落的时间窗限制, 构建一个协同优化多机场进出港航班排序模型。

【创新特色】尽管上述研究在机场群系统离港航班排序方面取得了丰富成果, 但仍有以下不足: 现有研究更多是对机场群系统中独立离港航班进行排序, 并未充分考虑进港航班的影响, 忽略了进港与离港航班间的相互作用; 离港航班排序目标大多数聚焦于

最小化航班延误, 而较少考虑跨多个机场的公平性问题。鉴于这些不足, 本研究针对正常天气下机场群系统因机场飞机起降作业繁忙而导致的离港航班延误问题, 构建模型对终端区多个机场的离港航班进行协同排序, 并设计非支配排序遗传算法(NSGA-II)对该模型进行求解, 以实现机场群终端区空域资源均衡配置, 提高离港航班运行效率。

【关键问题】本研究为后续机场群航班调度提供理论支撑。

1 机场群终端区离港航班排序模型

终端区作为机场飞行区与高空空域之间的关键连接部分^[11-12]。在机场群终端区有多个机场共用进离点, 进港航班和离港航班之间竞争跑道资源, 如何对空域和跑道资源进行合理配置, 直接影响到整个机场群终端区系统的运行效率^[13-15]。由于安全性原因, 在实际的航班调度中, 优先安排进港航班占用跑道, 随后利用跑道的空闲时间安排离港航班起飞。本文将进港航班的跑道占用时间作为约束条件, 在此基础上, 考虑管制移交间隔、尾流间隔、跑道运行间隔、时间窗约束以及最大位置移动约束等多种因素, 旨在对机场群终端区的离港航班进行合理排序, 实现机场群系统运行效率的整体提升和资源合理配置。

1.1 变量定义

1.1.1 输入集合

F : 所有航班集合, $i \in F$;

B : 离场点集合, $b \in B$;

A : 机场集合, $a \in A$;

R_a : 机场 a 的跑道集合, $r \in R_a$;

F_a : 机场 a 的离场航班集合;

$F_{a,r}^{ARR}$: 机场 a 跑道 r 上进场航班集合;

$F_{a,r}^{DEP}$: 机场 a 跑道 r 上离场航班集合;

1.1.2 输入参数

N_a : 机场 a 的离场航班总架次;
 q_i : 航班 i 在 FCFS 调度中的位置;
 Q : 位置移动上限;
 $e_{r,i}^a$: 航班 i 在机场 a 跑道 r 上的最早起飞时间;
 $l_{r,i}^a$: 航班 i 在机场 a 跑道 r 上的最晚起飞时间;
 $\varphi_{a,b}$: 机场 a 到离场点 b 的飞行时间;
 σ : 进场航班应满足的尾流时间间隔标准;
 $\omega_{r,i,j}^a$: 离场航班 i 和 j 在相同跑道 r 应满足的放行时间间隔标准;
 $\zeta_{r_1,r_2,i,j}^a$: 离港跑道 r_1 与进港跑道 r_2 构成窄距平行跑道, 离场航班 i 与进场航班 j 之间应满足的安全时间间隔标准;
 $\theta_{r_1,r_2,i,j}^a$: 进场航班 i 与进场航班 j 之间应满足的相关进近斜距安全标准;
 $\psi_{r,i}^a$: 进场航班 i 的跑道占用时间;
 Δ_b : 航空器在离场点 b 应满足的管制移交间隔标准(若 b 为非公共点, 则为 0);

1.1.3 决策变量

η_{r_1,r_2}^a : 跑道 r_1 与跑道 r_2 的运行模式是相关平行进近, 则为 1, 否则为 0;
 λ_{j_1,j_2}^a : 跑道 r_1 与跑道 r_2 构成窄距跑道(包括 r_1 与 r_2 是同一条跑道), 则为 1, 否则为 0;
 $\chi_{r_1,i,r_2,j}^a$: 跑道 r_1 的离场(进场)航班 i 先于跑道 r_2 的离场(进场)航班 j , 则为

1, 否则为 0;
 $Y_{i,j}^b$: 航班 i 与航班 j 皆通过离场点 b , 且航班 i 先于航班 j , 则为 1, 否则为 0;
 γ_b : 离场点 b 是公共离场点, 则为 1, 否则为 0;
 q_i : 航班 i 在最终离场队列中的位置;
 $t_{r,i}^a$: 机场 a 的第 r 条跑道上航班 i 的实际起飞(降落)时间。

1.2 目标函数

(1) 最小化机场群系统内所有航班延误之和

$$\min \sum_{a \in A} \sum_{r \in R_a} \sum_{i \in F_{a,r}} D_{r,i}^a \quad (1)$$

航班延误是衡量机场群终端区运行效率的重要指标, 式(1)表示最小化所有离港航班总延误。其中 $D_{r,i}^a = |t_{r,i}^a - e_{r,i}^a|$ 。

(2) 最大化机场群系统内所有机场的满意度之和

$$\max(\sum_{a \in A} Z_a) \quad (2)$$

机场的满意度反映了机场的运行效果, 式(2)表示最大化所有机场的满意度之和。

本文将机场的满意度 Z_a 定义为机场所有离港航班满意度的均值, 而离港航班满意度 ε_i

由离港航班时间满意度因子 ξ_i 与空间满意度因子 Φ_i 之和来表示, 如式(3)所示, 机

场满意度 Z_a 为机场内所有离场航班满意度 ε_i 之和离场航班数量 N_a 的比值, 如式(4)

所示, 其中时间满意度因子和空间满意度因子如式(5)和式(6)所示:

$$\varepsilon_i = \xi_i + \Phi_i, \forall i \in F \quad (3)$$

$$Z_a = \frac{\sum_{i \in F_a} \varepsilon_i}{N_a}, a \in A \quad (4)$$

$$\xi_i = \frac{1}{2} \frac{D_{\max} - D_i}{D_{\max} - D_{\min}}, \forall i \in F \quad (5)$$

$$\Phi_i = \frac{1}{2} \frac{W_{\max} - W_i}{W_{\max} - W_{\min}}, \forall i \in F \quad (6)$$

式(5)中的 D_i 是时间偏差,式(6)中

W_i 为位置偏移量, $W_i = |q_i - p_i|, \forall i \in F$,

q_i 为航班 i 在最终离场队列中的位置, p_i 为

航班 i 在FCFS调度中的位置

(3) 最大化机场群系统内机场公平性的整体度量

$$\min\left(\frac{1}{2} \sum_{a_1 \in A} \sum_{a_2 \in A} |Z_{a_1} - Z_{a_2}|\right) \quad (7)$$

为了实现机场群系统空域资源的均衡使用,在满意度的基础上引入机场公平性的概念,将机场群系统内机场公平性的整体度量定义为所有机场满意度的偏差,当机场满意度的偏差达到最小的时候,意味着机场群系统内机场公平性的整体度量达到最大,如式(7)所示。

1.3 约束条件

约束1 每架离港航班在公共离场点需要满足管制移交间隔限制,即:

$$tf_{j,b}^{a_2} \geq Y_{i,j}^b \gamma_b (tf_{i,b}^{a_1} + \Delta_b), \forall i \in F_{a_1}, \quad (8)$$

$$\forall j \in F_{a_2}, \forall b \in B$$

其中 $tf_{i,b}^a$ 表示航班 i 到达离场点 b 的时间,

$$tf_{i,b}^a = t_{r,i}^a + \varphi_{a,b},$$

约束2 同一跑道上两架离场航班之间需要满足放行间隔限制,即:

$$t_{r,j}^a \geq \chi_{r,i,r,j}^a (t_{r,i}^a + \omega_{r,i,j}^a), \forall i, j \in F_{a,r}^{dep} \quad (9)$$

约束3 在同一条跑道或者进港航班降落的跑道与离港航班起飞的跑道构成窄距平

行跑道,前一架航班为离场航班、后一架航班为进场航班的情况下,应满足安全间隔标准,即:

$$t_{r_2,j}^a \geq \chi_{r_1,i,r_2,j}^a \lambda_{j_1,j_2}^a (t_{r_1,i}^a + \zeta_{r_1,r_2,i,j}^a), \quad (10)$$

$$\forall i \in F_{a,r_1}^{dep}, \forall j \in F_{a,r_2}^{arr}$$

约束4 在同一条跑道上前机为进场、后机为离场的情况下,需要满足进港航班的跑道占用时间限制,即:

$$t_{r,j}^a \geq \chi_{r,i,r,j}^a (t_{r,i}^a + \psi_{r,i}^a), \quad (11)$$

$$\forall i \in F_{a,r}^{arr}, \forall j \in F_{a,r}^{dep}$$

约束5 同一条跑道上的两架进港航班应保持的尾流间隔,即:

$$t_{r,j}^a \geq \chi_{r,i,r,j}^a (t_{r,i}^a + \sigma), \quad (12)$$

$$\forall i, j \in F_{a,r}^{arr}$$

约束6 同一个机场,两架进场航班在不同跑道上降落且是相关进近,应保持的间隔限制,即:

$$t_{r_2,j}^a \geq \chi_{r_1,i,r_2,j}^a \eta_{r_1,r_2}^a (t_{r_1,i}^a + \theta_{r_1,r_2,i,j}^a), \quad (13)$$

$$\forall i \neq j, \forall i \in F_{a,r_1}^{arr}, \forall j \in F_{a,r_2}^{arr}$$

约束7 起飞时间窗限制

$$e_{r,i}^a \leq t_{r,i}^a \leq l_{r,i}^a, \forall i \in F_{a,r}^{dep} \quad (14)$$

约束8 最大移动位置限制

$$|q_i - p_i| \leq Q, \forall i \in F \quad (15)$$

约束9 其他参数约束限制

$$\eta_{r_1,r_2}^a, \lambda_{j_1,j_2}^a, \chi_{r_1,i,r_2,j}^a, Y_{i,j}^b, \gamma_b \in \{0,1\} \quad (16)$$

$$e_{r,i}^a, l_{r,i}^a, \varphi_{a,b}, \sigma_{r,i,j}^a, \omega_{r,i,j}^a, \zeta_{r_1,r_2,i,j}^a, \quad (17)$$

$$\theta_{r_1,r_2,i,j}^a, \psi_{r,i}^a, \Delta_b, p_i, q_i, t_{r,i}^a \geq 0$$

2 算法设计

本文通过设计非支配排序遗传算法(NSGA-II)对构建的模型进行求解。NSGA-II通过非支配排序过程快速识别解之间的支配关系^[16-17];采用精英策略保留每一代种群中的优秀解,有利于加速收敛;引入拥挤距离计算,确保解的多样性和均匀分布^[18-21]。

2.1 算法流程

步骤一：读取机场群终端区相关信息。
步骤二：确定所有离港航班的最早、最晚起飞时间、离场航线、离场点、跑道以及在终端区的飞行时间。

步骤三：采用染色体编码方式，生成种群的个体。

步骤四：解码，确定机场群系统内所有离港航班的初始离场顺序以及初始离场时间。

步骤五：根据预计进场顺序，结合间隔要求，计算出进场航班的跑道占用时间，进而确定混合跑道上可供离港航班起飞的时间段。

步骤六：根据离港航班可起飞的时间段、跑道间隔、终端区飞行时间、离港航班的起飞时间窗、管制移交间隔，确定离港航班的目标起飞时间。

步骤七：计算三个目标函数，通过非支配排序、选择、交叉、变异操作，生成 500 个子代，将所有子代个体添加到父代种群到，对新的父代种群执行快速非支配排序，得到每一层 Pareto 前沿；计算拥挤距离对所有可行解进行拥挤距离排序，选取排名前五百个为父代种群。

步骤八：当进化次数未达到最大进化次数时，进化次数加 1，转到步骤四，继续寻找最优解，若达到了最大进化次数，输出 Pareto 最优解

算法流程图如图 1 所示：

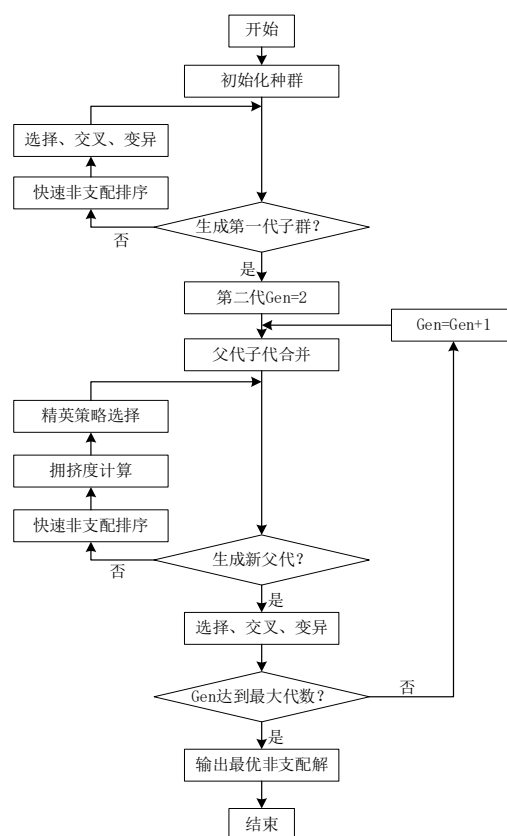


图 1 非支配排序遗传算法流程图

Fig.1 Flowchart of Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

2.2 算法实现

(1) 染色体编码

本文通过排序编码方法对离港航班序列进行编码处理。离港航班的起飞顺序决定了它在染色体序列中的位置，每个离港航班在序列里的排列顺序相当于染色体上的一个独特基因位点，保证了每个位置的唯一性，种群内不同的基因排列反映不同的航班起飞顺序^[22]，如图 2 所示：如果需要优化排序的离港航班数量为 8，图中染色体代表的离港航班的放行顺序为 0-7-6-5-3-4-1-2。根据染色体表示的离港航班顺序，结合模型相关约束确定离港行航班的离场时间。



图 2 染色体编码

Fig.2 Chromosome Encoding

(2) 交叉算子

本文采用部分映射交叉^[23] (Partially Mapped Crossover, PMX)，即对于交叉区外的基因，如果它在子代中重复了，通过映射

关系找到一个在子代中没有使用的基因来替换,确保染色体中所有的基因都是唯一的。

(3) 变异算子

本文采用逆转变异算子^[23] (Inversion Mutation Operator)进行变异操作,将上述执行完交叉的基因进行顺序逆转,即第一个基因与最后一个基因交换位置,依次类推,生成新的子代个体。

3 实例验证

3.1 实验设计

北京机场群终端区空域是亚洲最繁忙的机场群终端区空域系统之一,主要由北京首都国际机场(ZBAA)、北京大兴国际机场(ZBAD)、天津滨海国际机场(ZBTJ)三个机场构成,如图3所示。本研究以向北运行为例,三个机场的跑道运行模式如表1所示。机场群终端区包含9个离场点,分别为BOTPU、DOTRA、ELKUR、IDKEX、IGMOR、MUGLO、OMDEK、PEGSO和RUSDO,以及9个进场点,分别为AVBOX、BELAX、BUMDU、DUGEB、DUMAP、ELAPU、GUVBA、OMDEK和OSUBA。

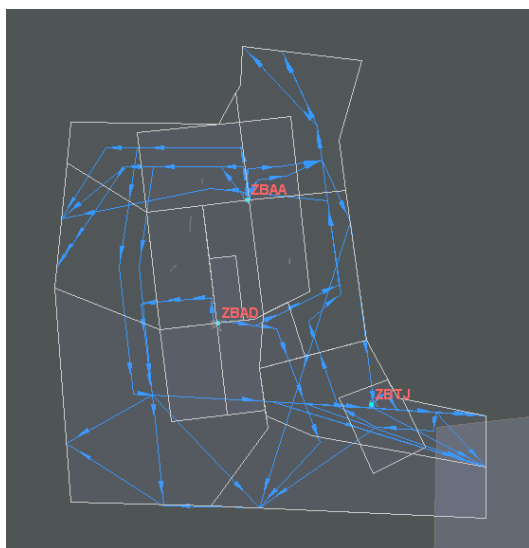


图3 北京终端区空域结构

Fig.3 Beijing Terminal Area Airspace Structure

表1 三个机场的跑道运行模式

Tab.1 Runway Operation Modes at Three Airports

机场	跑道	跑道使用	
首都机场	01	混合	
	(5: 30-23: 30)	36R 36L	起飞 混合
	(23: 30-5: 30)	36R	混合
		36L	混合
大兴机场	11L	起飞	
	01L	降落	
	35R	起飞	
	35L	降落	
天津机场	34L	起飞	
	34R	降落	

模型考虑进港航班的影响,故选取三个机场某一个典型日 10:15-11:15 时间段,该时间段内离港航班数量总共 49 架次,进港航班数量总共 75 架次,其中首都机场进离港航班数量分别是 34 架次和 11 架次,大兴机场进离港航班数量分别 26 架次和 24 架次,天津机场进离港航班数量分别 15 架次和 14 架次。研究时段内涉及 BOTPU、DOTRA、ELKUR、IDKEX、MUGLO、OMDEK、PEGSO、RUSDO 八个离场点。

遗传算法参数:染色体长度 49,其他参数通过迭代测试的方式来确定,分别为最大进化次数为 200,种群个体数量为 500,交叉概率为 0.9,变异概率 0.02。算法运行时间为 39 分钟,操作系统为 Windows 10 64-bit,计算机处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-7300HQ CPU @ 2.50GHz。

3.2 结果分析

实验结果显示,随着多目标遗传优化算法进化次数的增加,Pareto 前沿的最优解可以被快速的定位到。图4是经过种群演变得到最终代的 Pareto 前沿的最优解集。图5~图7分别是最小化机场群系统内所有航班延误之和、最大化机场群系统内所有机场满意度之和以及最大化机场群系统内机场公平性的整体度量在进化过程中的变化趋势。多次实验表明,种群经过 120 次迭代已经逐渐收敛。从最后一代中选取一个 Pareto 解(5029,2.3601,0.0044),将其离港航班排序方案作为优化方案,通过与先到先服务策略

下的离港排序方案相比较,验证优化方案的优越性。

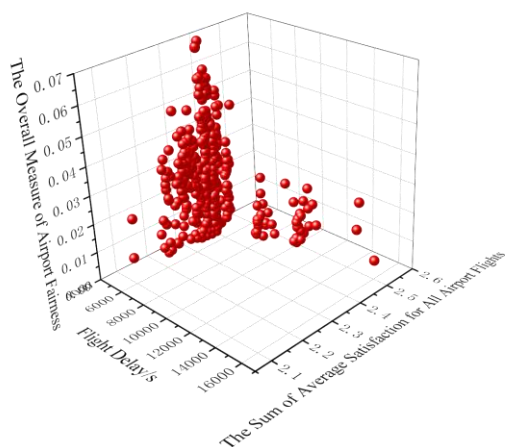


图4 最优 Pareto 解

Fig.4 optimal Pareto solution

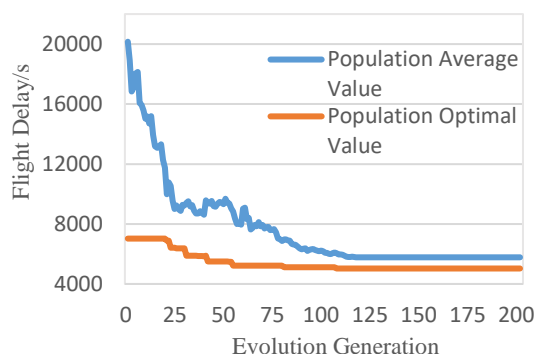


图5 航班延误总时间变化趋势

Fig.5 Trend of Total Flight Delay Time

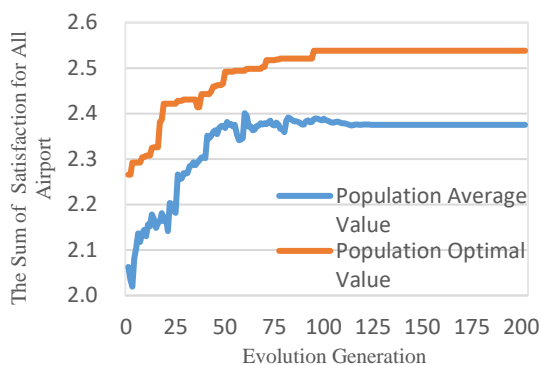


图6 所有机场满意度之和变化趋势

Fig.6 Trend of the Sum of Satisfaction for All Airport

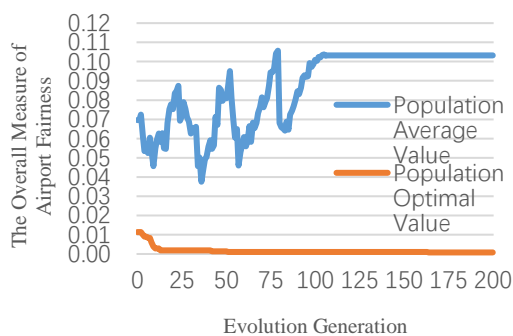


图7 机场公平性的整体度量变化趋势

Fig.7 Trend in the Overall Measure of Airport Fairness

图8展示了采用两种不同排序方案下离港航班延误时间比较。结果表明,采用优化排序方案,大部分航班的延误时间低于FCFS方案。在FCFS方案下,所有离港航班的延误总和是7796秒,在优化方案下,离港航班延误总和减少至5029,降低了35.5%;采用FCFS的离港航班排序方案,平均每架航班延误159秒,而模型求解的优化离港排序方案则是将平均延误时间减少到103秒,大大提高了整个机场群终端区离港航班放行效率。

图9展示两种不同排序方案下离港航班起飞时间对比,图中线条长短代表FCFS方

案与优化方案下起飞时间差值大小;蓝色表示优化方案的离港航班起飞时间早于FCFS方案的起飞时间,红色则表示优化方案的离港航班的起飞时间晚于FCFS方案的起飞时间。从图中可以看出优化方案中大多数航班的起飞时间早于FCFS方案下离港航班起飞时间,优化后有37架航班的起飞时间是早于FCFS方案下航班的起飞时间,12架航班的起飞时间晚于FCFS方案下航班的起飞时间,在优化方案中,每架航班平均移动1.75个位置,对三个机场离港航班到达终端区的顺序进行合理排序,实现机场群终端区离港航班的快速放行,提高系统的运行效率。



图 8 FCFS 策略与优化策略下航班延误时间对比

Fig.8 Comparison of Flight Delay Times Under FCFS Strategy and Optimization Strategy

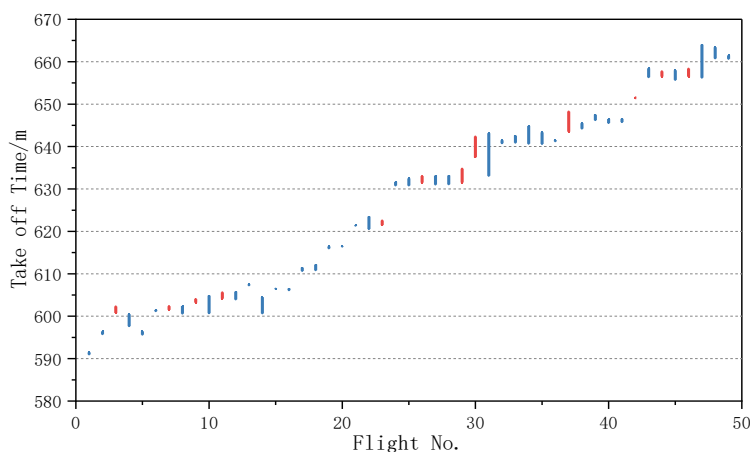


图 9 FCFS 策略与优化策略下离港航班起飞时间对比

Fig.9 Comparison of Departure Flight Takeoff Times Under FCFS Strategy and Optimization Strategy

图 10 展示了优化离港排序方案下所有航班的满意度分布情况，从图中可以看出大多数航班的满意度大于 0.7，49 架离港航班平均满意度为 0.7867，其中首都机场平均航班满意度为 0.7854，大兴机场平均航班满意度为 0.7876，天津机场平均航班满意度为 0.7871，大兴国际机场的航班平均满意度高于首都国际机场和天津机场。机场群中机场公平性的整体度量为 0.0044，意味着三个机场在终端区空域资源分配上达到一个均衡状态。

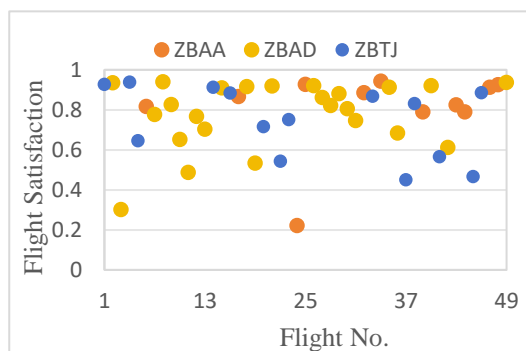


图 10 优化策略下航班满意度分布情况

Fig.10 Distribution of Flight Satisfaction Under Optimization Strategy

4 结论

针对机场群终端区空域拥堵、离港航班放行效率低下等问题,本文以离港航班总延误最小、机场群系统内所有机场离港航班平均满意度之和最大、机场群系统内机场公平性的整体度量最小为优化目标,建立机场群终端区离港航班协同排序模型。通过与先到先服务方案相比较,该模型求解出的离港航班排序方案更加合理。航班总延误时间降低了35.3%;引入“离港航班满意度”的概念,三个机场的离港航班平均满意度之和达到2.3601;机场公平性的整体度量为0.0044,表明该模型即提高了机场群终端区的运行效率、系统的整体满意度,同时还实现机场群终端区内的时空资源公平分配给三个机场。

参考文献:

- [1] 张军峰,葛腾腾,郑志祥.机场群终端区进离场航班协同排序研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(2):197-204.
ZHANG J F, GE T T, ZHENG Z X. Research on the collaborative sequencing of arrival and departure flights in the terminal area of airport clusters[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2022,48(10):2048-2060.
- [2] 葛腾腾.多机场终端空域进离场协同调度研究[D].南京航空航天大学,2017.
GE T T. Research on collaborative scheduling of arrival and departure aircrafts in multi-airport terminal area[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017.
- [3] 尹嘉男,胡明华,张洪海,等.多跑道协同运行模式优化方法[J].航空学报,2014,35(3):795-806.
YIN J, HU M H, ZHANG H H, et al. Optimization methods for collaborative runway operation modes. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica[J].2014,35(3), 795-806.
- [4] 王莉莉,张潇潇.机场群协同决策进离场航班排序模型及算法研究[J].飞行力学.2016,34(1):1-5.
WANG L L, ZHANG X X. Research on models and algorithms for cooperative decision-making of arrival and departure flight sequencing in airport clusters[J]. Flight Mechanics, 2016,34(1),1-5.
- [5] 赵彩霞,李海峰.机场群终端区联合放行策略[J].交通信息与安全,2012,30(3):83-86.
ZHANG C X, LI H F. Joint release strategies for terminal areas in airport clusters. [J] Transportation Information and Safety,2012,30(3), 83-86.
- [6] LIU M, SUN Z, ZHANG X, et al. A two-stage no-wait hybrid flow-shop model for the flight departure scheduling in a multi-airport system[C]//14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). IEEE, 2017: 495-500.
- [7] ALAN C, MATTEW K, SHAWN E. Design characteristics of a terminal departure scheduler[C]//14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Atlanta, AIAA 2014:1-17
- [8] LI Z, CAI K, ZHAO P. Departure scheduling for multi-airport system using multi-agent reinforcement Learning. [C]//42nd AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE, 2023: 1-9.
- [9] WANG F, ZHANG J F, GE T T, et al. Dynamic departure sequencing based on branch and bound algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(4): 547-552.
- [10] 马园园,胡明华,尹嘉男,等.机场群终端区进离场交通流协同排序方法[J].航空学报, 2017, 38(2):225-237.
MA Y Y, HU M H, YIN J N, et al. Collaborative sequencing and scheduling method for arrival and departure traffic in multi-airport terminal area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2017,38(2):225-237.
- [11] BADRINATH S, LI Z M, BALAKRISHNA N. Integrated Surface-Airspace Model of Airport Departures[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,2019,42(5):1049-1063.
- [12] SIDROPOULOS S, MAJUMDAR A, HAN

- K.A framework for the optimization of terminal airspace operations in Multi-Airport Systems[J]. Transportation Research Part B,2018, 110 160-187.
- [13] ZHANG H H, YAN X, YANG L X, et al. Macroscopic Model and Simulation Analysis of Air Traffic Flow in Airport Terminal Area [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014, 2014 1-15.
- [14] MURCA R C M, HANSMAN J R, LI L, et al. Flight trajectory data analytics for characterization of air traffic flows: A comparative analysis of terminal area operations between New York, Hong Kong and Sao Paulo[J]. Transportation Research Part C,2018,97324-347.
- [15] 朱莉,武丁杰,许凌宇,等. 基于三方博弈的终端区协同容流调配策略研究[J].航空计算技术,2023,53(05):62-66.
- ZHU L,WU D J,XU L Y,et al.Collaborative capacity allocation strategy of terminal area based on three-party game[J].Aeronautical Computing Technique,2023,53(05):62-66.
- [16] TABRIZ H Z, TAHERI H M, KHANI L,et al.Enhancing a bio-waste driven polygeneration system through artificial neural networks and multi-objective genetic algorithm: Assessment and optimization[J].International Journal of Hydrogen Energy,2024,58 1486-1503.
- [17] HAO S, HUI N X, YI Q T,et al.Multi-objective optimization of operation strategy in snow melting system for airfield runway using genetic algorithm: A case study in Beijing Daxing International Airport[J].Renewable Energy,2022,201(P2):100-116.
- [18] ABDULRAOOF A, MOHAMMED Q, ABDULLAH A. Integer Search Algorithm:A New Discrete Multi-Objective Algorithm for Pavement Maintenance Management Optimization [J].Applied Sciences,2021,11(15):7170-7170.
- [19] JIN J T,YI F Y,WEI H,et al. A Data-Driven Timetable Optimization of Urban Bus Line Based on Multi-Objective Genetic Algorithm [J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation System,2021,22(4):2417-2429.
- [20] LI X, SUN J.Multi-objective optimal predictive control of signals in urban traffic network[J].Journal of Intelligent Transportation Systems,2019,23(4):370-388.
- [21] 赵征,宋梅雯,朱洁,等.基于动态多目标优化的航班预先飞行计划优化研究[J].航空计算技术,2022,52(06):6-10.
- [22] ZHAO Z,SONG W M,ZHU J,et al.Research on pre-flight plan adjustment method based on dynamic multi-objective optimization[J].Aeronautical Computing Technique,2022,52(06):6-10.
- [23] 胡杰,鲍帆,石潇竹.基于贪婪-遗传算法的机场登机口分配策略[J].系统工程与电子技术,2023, 45(11):3555-3564.
- HU J,BAO F,SHI X Z. airport gate assignment strategy based on greedy-genetic algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023,45(11):3555-3564.
- [24] 吴薇薇,徐幼婷,刘硕,等.考虑出行效用的空铁联运需求研究[J].华东交通大学学报,2021,38 (01):136-141.
- WU W W,XU Y T,LIU S,et al.research on passenger demand of air-rail intermodal transport considering passenger travel utility[J].Journal of East China Jiaotong University,2021,38(01):136-141.
- [25] 丁文浩,胡明华,江斌.基于熵权法的平行跑道多模式进场效能分析[J].华东交通大学学报,2023,40(01):44-51.
- DING W H, HU M H, JIANG B.Multi-mode approach effectiveness analysis of parallel runways based on entropy weight method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023,40(01):44-51.



第一作者: 宛照坤(1999—),男,研究方向为
空域规划与管理。E-mail: 508731998@qq.com



通信作者：彭瑛（1978—），女，讲师，博士，
硕士生导师，民航局空管办容量评估专家，研究方
向：空中交通管理。E-mail: py423@sina.com。